



# ФЕДЕРАЛЬНОЕ КОСМИЧЕСКОЕ АГЕНТСТВО

Федеральное государственное унитарное предприятие  
«Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина»



Ленинградская ул., д. 24, г. Химки, Московская область, Российская Федерация, 141400  
тел. (495) 629-67-55, факс (495) 573-35-95,  
e-mail: npol@laspace.ru, http://www.laspace.ru

10.01.2017 № 516/116  
на № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

Председателю  
диссертационного совета Д 212.125.10  
д.т.н., профессору Ю.И.Денискину

125993, г. Москва, А-80, ГСП-3,  
Волоколамское шоссе, д.4

«УТВЕРЖДАЮ»



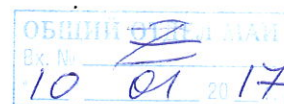
Заместитель генерального директора  
генеральный конструктор  
кандидат технических наук  
М.Б. Мартынов

«10» января 2017 г.

## ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу  
**Ненарокова Кирилла Алексеевича**  
**«Разработка методов дефектоскопии тепловой защиты надувных  
тормозных устройств спускаемых космических аппаратов»,**  
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 05.07.03 – «Прочность и тепловые режимы летательных  
аппаратов»

Диссертационная работа Ненарокова К.А. посвящена разработке методов ускоренных испытаний гибкой тепловой защиты надувных тормозных устройств спускаемых аппаратов (НТУ СА) с целью обнаружения и характеристики имеющихся дефектов. Данная проблема возникает на различных этапах испытаний и предполетной подготовки надувных конструкции.



Актуальность темы исследования. Обеспечение надежности функционирования космических аппаратов, и прежде всего, пилотируемых и автоматических десантных аппаратов, было и остается одной из первостепенных задач, определяющих основные проектно-конструкторские решения на всех этапах жизненного цикла изделия. Современные тенденции развития космической техники связаны с ужесточением условий механического и теплового нагружения различных систем, при необходимости повышения их надежности и ресурса и одновременного снижения стоимости экспериментальной отработки и испытаний. В частности, для систем тепловой защиты НТУ СА обеспечение целостности надувных конструкций до начала эксплуатации, основанные на применении материалов с соответствующими свойствами и тщательного контроля, является одним из важнейших этапов жизненного цикла изделия. В связи со спецификой испытаний и эксплуатации гибкой теплозащиты НТУ, возникает необходимость диагностики дефектов состояния конструкции теплозащиты непосредственно в процессе отработки и подготовки к полету. Использование разработанных средств дефектоскопии позволяет своевременно выявлять дефекты материалов и элементов конструкции уже на стадии их изготовления и испытаний. Для получения как можно более точных результатов измерений необходимо обладать достоверной информацией о характеристиках анализируемых дефектов. Однако в большинстве случаев прямое измерение характеристик дефектов конструкций (особенно сложного состава) является невозможным. В этом случае единственным путем, позволяющим определять необходимые характеристики, является не прямое измерение. Математически подобный подход обычно представляет собой решение обратной задачи математической физики: по прямым измерениям состояния системы (акустического давления в среде) определяются свойства анализируемой системы (геометрические размеры дефектов).

Существующие методы испытаний не позволяют количественно оценить характеристики дефектов в НТУ СА. Данное обстоятельство послужило

основанием для разработки метода дефектоскопии, в которой специальное внимание уделено оценке геометрических характеристик дефектов. В расчетной модели учитывается нелинейность свойств среды при распространении акустических свойств в пространстве. В работе разработан алгоритм решения обратной задачи нелинейной акустики, позволяющий определять наличие и характеристики дефектов в тепловой защите НТУ СА с достаточно высокой точностью. Таким образом, задача разработки новых методов дефектоскопии тепловой защиты надувных тормозных устройств спускаемых космических аппаратов является актуальной.

**Целью диссертационной работы** является создание методов и алгоритмов для дефектоскопии элементов конструкции надувных оболочек тормозных экранов СА, основанных на параметрической идентификации математической модели распространения продольных волн в упругой среде.

**Структура и содержание диссертационной работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка использованных источников из 57 наименований, содержит 147 страниц основного текста, 62 рисунка и 6 таблиц.

**Во введении** обосновывается актуальность тематики исследований, сформулирована цель работы и представлен список задач, решение которых необходимо для достижения поставленной цели.

**В первой главе** приведен анализ общих вопросов, касающихся проблем разработки методов дефектоскопии на основе обратных задач нелинейной акустики. Проведенный анализ позволил сделать выводы о принципиальном подходе к проведению испытаний и методике построения приближенных одномерных математических моделей распространения продольных волн в элементах конструкции гибкой теплозащиты. По данным выводам были сформулированы цели исследований, поставлены задачи, требующие решения, а также приведена постановка задачи параметрической идентификации математических моделей применительно к определению геометрических параметров дефектов конструкции. Были рассмотрены различные формы

записи математических моделей, на основании чего были выявлены наиболее существенные закономерности формирования их структуры.

Во второй главе был разработан алгоритм решения обратной задачи теплообмена, в основу которого был положен метод итерационной регуляризации, с обоснованием предварительной параметризации искомых функциональных зависимостей. Выбор подобного подхода обусловлен высокой вычислительной эффективностью данного метода. Выбранная обобщенная математическая модель распространения продольных волн позволяет анализировать различные механические явления, в том числе и геометрические параметры дефектов в исследуемых элементах конструкции теплозащиты.

В третьей главе были рассмотрены вопросы реализации предлагаемой процедуры идентификации как вычислительного алгоритма. По результатам проведенного анализа существующих вычислительных алгоритмов были выбраны способы конечно-разностной аппроксимации дифференциальной задачи и граничных условий.

В четвертой главе были проанализированы свойства предлагаемого в работе подхода путем вычислительного эксперимента. Проводилось моделирование влияния различных погрешностей на результаты решения обратной задачи. В качестве исходной информации использовались данные модельного эксперимента – на основе априорной информации о свойствах дефектов материала решалась прямая задача нелинейной акустики, а затем рассчитанные значения акустического давления в предполагаемых точках измерений использовались для решения соответствующей обратной задачи в качестве дополнительной «экспериментальной» информации. Было проанализировано влияние задаваемых значений начальных приближений искомых функций, влияние числа параметров аппроксимации, влияние точности задания градиента давления, известных коэффициентов уравнения. Полученные результаты моделирования показали достаточно высокую вычислительную устойчивость предлагаемого алгоритма и слабое влияние

начальных приближений на точность решения анализируемой задачи. Достаточно важным результатом моделирования стал вывод о применимости принципа остановки по невязке для рассматриваемой задачи.

В пятой главе описаны результаты проведенного исследования геометрических характеристик дефектов теплозащитного материала. Целью проведенных исследований было 1) определение положения дефектов теплозащитного материала, 2) определение геометрических характеристик обнаруженных дефектов. Методика проведения подобных исследований и полученные результаты определения свойств предварительно искусственно созданных дефектов материалов позволяют говорить о достаточно высокой практической ценности предлагаемого в работе подхода.

**Научная новизна.** Предложенный в диссертационной работе метод для решения задачи параметрической идентификации нелинейной обобщенной математической модели распространения продольных волн в среде с целью обнаружения скрытых дефектов является новым и заслуживает пристального внимания. Также разработан новый экспериментальный способ дефектоскопии оболочки надувного тормозного экрана СА на основании измерения акустического давления. В работе определены принципиальные возможности выявления геометрических параметров дефектов элементов конструкции по значению коэффициента нелинейности в математической модели распространения продольных волн.

**Практическое значение** диссертационной работы заключается в том, что - создание прототипа экспериментальной установки, реализующей разработанный в работе метод дефектоскопии, который может использоваться для создания промышленных установок неразрушающего контроля различных систем и агрегатов:

- разработка прикладного программного обеспечения, используемого для определения широкого спектра различных коэффициентов (характеристик) нелинейных математических моделей распространения продольных волн в материалах и элементах конструкций.

Предложенные в работе алгоритмы и методики использовались при разработке экспериментального надувного тормозного устройства Тепловой лаборатории кафедры "Космические системы и ракетостроение" МАИ совместно с ФГУП "НПО им. С.А. Лавочкина", а также при проведении учебных и учебно-практических занятий студентами МАИ.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований, проведенных соискателем в процессе работы над диссертацией могут быть рекомендованы к использованию в ФГУП "НПО им. С.А. Лавочкина" при разработке перспективных НТУ СА.

**Публикации.** Основные результаты работы опубликованы в трех статьях в рекомендованном ВАК периодических изданиях «Тепловые процессы в технике» и «Вестник МАИ».

**Замечания по работе:**

1. В алгоритме решения обратной задачи рассматриваются многослойные образцы элементов конструкции. Однако, в последующих главах работы, рассматриваются однослойные элементы конструкции. В результате возникает вопрос, зачем в диссертации и математических моделях введены в рассмотрение многослойные элементы, если это не находит дальнейшего применения?

2. В предложенном методе обнаружения дефектов (первый этап исследований) необходима установка измерительных средств на обратной поверхности исследуемых элементов, что существенно ограничивает область применения методики.

**Заключение.** Несмотря на сделанные замечания, диссертационная работа К.А. Ненароковой представляет собой законченное исследование, посвященное актуальной теме и выполненное на высоком научно-техническом уровне. Диссертация удовлетворяет требованиям, предъявляемым ВАК к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.03 – "Прочность и тепловые режимы летательных

аппаратов", а ее автор, Ненарокомов Кирилл Алексеевич, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук.

Материалы диссертации Ненарокова К.А. «Разработка методов дефектоскопии тепловой защиты надувных тормозных устройств спускаемых космических аппаратов» прошли обсуждение на заседании комплекса 510 от 10.01.2017, по результатам которого был утвержден отзыв.

Заместитель генерального конструктора  
по общему проектированию

И.В. Москатыев

Заместитель начальника комплекса 510

Д.В. Тулин

Ведущий конструктор отдела 515  
кандидат технических наук

А.Ф. Шабарчин

Начальник отдела 516

С.Н. Устинов

Зам. начальника отдела комплекса 510

С.Н. Алексашкин

Ведущий научный сотрудник отдела 516,  
доктор технических наук

А.А. Иванов